

有色冶金炉窑的仿真与优化^①

梅 焱 王前普 彭小奇 周子民

(中南工业大学物热系, 长沙 410083)

摘 要 分析了有色冶金炉窑的特点, 认为有色冶金炉窑作为研究对象, 可看作“高温反应器”, 其主要研究内容可概括为“三传二反”, 即: 流体动量传递、热量传递、质量传递以及化学反应动力学、炉窑反应器结构原理与设计。提出了一种有效的研究方法, 即“数学模拟—全息仿真—整体优化”, 并列举了成功应用的实例。

关键词 有色冶金炉 仿真 优化 研究方法

1 有色冶金炉窑的特点

1.1 类型多

常用的有色金属有 60 余种, 有色提取冶金过程的通用或专用炉窑有近百种。从热源与供热方式看, 有燃烧炉与电炉; 从工作特点看, 有火焰炉、隔焰炉、倒焰炉、流化床炉、移动床炉、载流悬浮式炉、熔池—喷吹式炉、电阻炉、感应式炉、电弧炉、电子轰击炉、等离子火炬式炉等; 从结构特点看, 有水平炉膛(通称反射炉)、竖井式、回转式、多膛式、旋涡式等等。

1.2 能耗大

从原料精矿提取 1t 金属的综合能耗(吨当量煤/吨)比钢铁要高出很多倍(见附表)。从表中数据可看出, 不论是与钢铁比还是与先进指标比, 有色冶金过程存在着相当大的节能潜力。

1.3 热工过程与工艺过程强烈耦合

例如, 有色冶金炉窑的供热速率和炉子温度往往不取决于燃料燃烧或供能系统, 而是受控于硫化物料的焙烧或熔炼速率; 有时, 炉窑内冶金反应速率往往受炉内诸传递过程的强烈制约。

因此, 从本质看, 多数有色冶金炉窑都可

视为某种“高温反应器”, 同时, 可将炉窑内进行的所有过程与全部研究内容概括为“三传二反”, 即: 流体动量传递、热量传递、质量传递以及反应动力学过程、炉窑反应器结构原理与设计五大内容。

参照化学工程与钢铁冶金中“反应工程学”的学科体系, 有色冶金炉窑的“三传二反”也可称之为有色冶金的“高温反应工程学”。

附表 主要金属冶炼综合能耗(tce/t)¹⁾

金属	钢材 ²⁾	电铜	铝锭	电镍 ³⁾
一般	1.1	2.0~ 3.0	7.0~ 9.0	8.5~ 27.0
先进	< 1.0	1.2~ 1.4	5.5~ 6.2	7.0~ 16

金属	电锌	镁锭	钛锭
一般	2.0~ 2.6	11.5~ 13.5	12.0~ 13.5
先进	1.5~ 1.8	5.6~ 9.5	9.0~ 10.0

注: 1) tce/t—吨当量煤/吨;

2) 包括成材加工过程的能耗;

3) 低值对应硫化矿, 高值对应氧化矿。

1.4 参变量复杂

相对于一般加工用炉与机械工业用炉, 有色冶金炉窑中的参数、工艺参数与物性参数等相互耦合, 彼此影响大, 很难保持恒定, 检测结果往往滞后于工艺过程, 因而形成多变量、强耦合、大滞后等特点, 增加了不稳定因素。

① 收稿日期: 1995- 06- 16; 修回日期: 1995- 09- 01 梅 焱, 男, 62 岁, 教授, 博士生导师

2 有色冶金炉窑研究方法的发展

2.1 从类比—经验法到数学模拟法

从上述有色冶金炉窑的特点可以看出, 对这种对象的研究, 特别是数量化、精确化的研究有不少困难, 因而至今有色冶金炉窑中的能源利用率、强化程度、自控水平、炉体寿命等方面仍处于比较落后的状态。

在本世纪 50 年代以前, 炉窑研究与设计一般采用类比—经验法, 即: 参照同类性质或较近似的作业装置的实践经验数据进行类比分析, 然后进行外延放大。其优点是较稳妥实用, 但存在明显的局限性和潜在的盲目性。此外, 对新工艺新炉型的开发显得无能为力, 这在相当程度上影响了有色冶金的研究开发和技术进步。

本世纪中期以来, 开始较多地采用相似模型实验法, 即按几何相似与物理过程相似原理, 设计缩小比例模型, 在实验室条件下研究出结果并找出规律, 再推广应用于原型装置的设计与操作中去。此种方法既具有一定的直观性, 又可以深入一步发掘实测数据中的信息, 从而使研究结果具有较大的适应范围和更多的科学概括性。然而, 对于某些特殊条件下(如高温、高压、高速、剧毒等)的工作对象, 模型实验法也遇到了困难。

随着计算机技术的发展与普及, 用数值方法研究各种复杂对象的可能性大大增加。70 年代以来, 有色冶金炉窑也开始采用数学模拟法, 即通过观察研究, 对炉窑中的各种过程在空间与物理现象上进行简化, 形成物理模型, 再利用“三传二反”的原理与方法, 以不同的数学方程来描述各参变量间的函数关系, 加上有关边界条件与数据资料建成数学模型。利用计算机即可算出不同原始参数与边界条件下整个解析空间的参数量值^[1, 3-5]。

对于变量多、强耦合、滞后大的对象, 很难找到确定性的数学方程来描述。近年来开发应用人工智能性的数值模拟方法, 如模糊分析

法^[2, 8, 9]、专家系统或人工神经网络等^[11], 再配上优选的实践数据库, 形成人工智能模型。此类模型的准确程度在很大程度上取决于优化实践数据库的质量。为此, 可以通过实践不断更新和修正原有数据, 使其具有自学习、自适应的功能。目前, 数学模拟方法已进入一个非常活跃而广阔的领域。

2.2 “全息仿真”

利用数学模型和解算程序, 加上有关数据文件(如结构参数、操作条件与物性参数), 可迅速解算出相应的参数量值分布。只要数学模型、计算程序与数据文件经过充分识别与验证, 计算结果就能比较精确、全面地反映研究对象的运行状态。这个过程称为计算机仿真^[1, 4-6]。所用的数学模型、计算程序与相应的数据库的结合, 称为该过程的“仿真软件”。

对于多个过程耦合的对象, 可以在分别研制出单元过程仿真软件之后, 将其套装成解析空间可以全面覆盖、解析程序互相支持、数据与结果可以互相调用、形成耦合解算的仿真软件。为了区别于单元过程仿真, 将这种耦合仿真称为该过程的全息仿真。显然, 全息仿真与单参数仿真不仅有参数数量上的差别, 而且在仿真的本质与机理上更“逼真”, 在结果上更准确、更可靠。

2.3 “整体优化”

全息仿真软件不仅可用来预报某种原始条件下的运行结果, 而且可以对一系列不同的结构设计与操作条件经济而快速地预报出运行效果。人们可以从中选择出效果最佳的设计方案与操作条件, 即实现“人工寻优”。对于复杂现象, 可以同时规定若干个最佳指标和一些具体要求作为目标函数和约束条件, 利用全息仿真软件, 计算出最佳设计参数和操作条件, 以实现多参数耦合优化, 即整体优化。

整体优化是最终目标, 全息仿真是主要手段, 而这一切都以对象的精确数学模拟为基础或前提。“数学模拟—全息仿真—整体优化”, 这就是现代研究有色冶金炉窑最有生命力的综合研究方法。其系统结构见图 1。

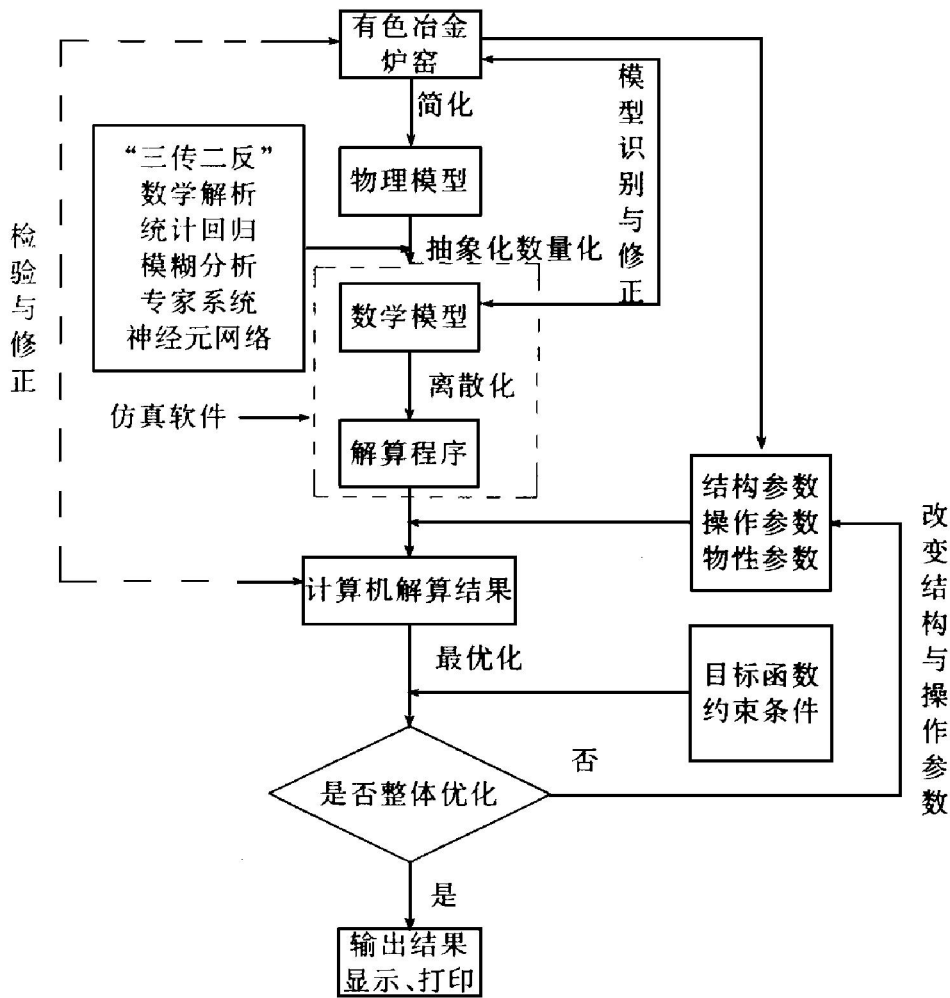


图 1 计算机仿真与优化系统结构

——→程序调用; - - -→离线调用

3 有色冶金炉窑仿真与优化研究实例

3.1 铝电解槽的全息仿真与优化^[1, 3, 5]

对铝电解过程技术经济指标有重要影响的参数有：母线配置、槽体与内衬结构以及电解质成分、熔体温度、极距、下料制度等操作参数。这些因素集中表现为电解槽内的电磁场、温度场、槽膛内形、熔体流动与铝液面形状等。因此，铝电解过程的全息仿真软件包必须包含上述各单元过程的仿真(见图 2)。近年来，国内有关单位合作研制的这种软件包已用于工程设计与生产监控，例如：

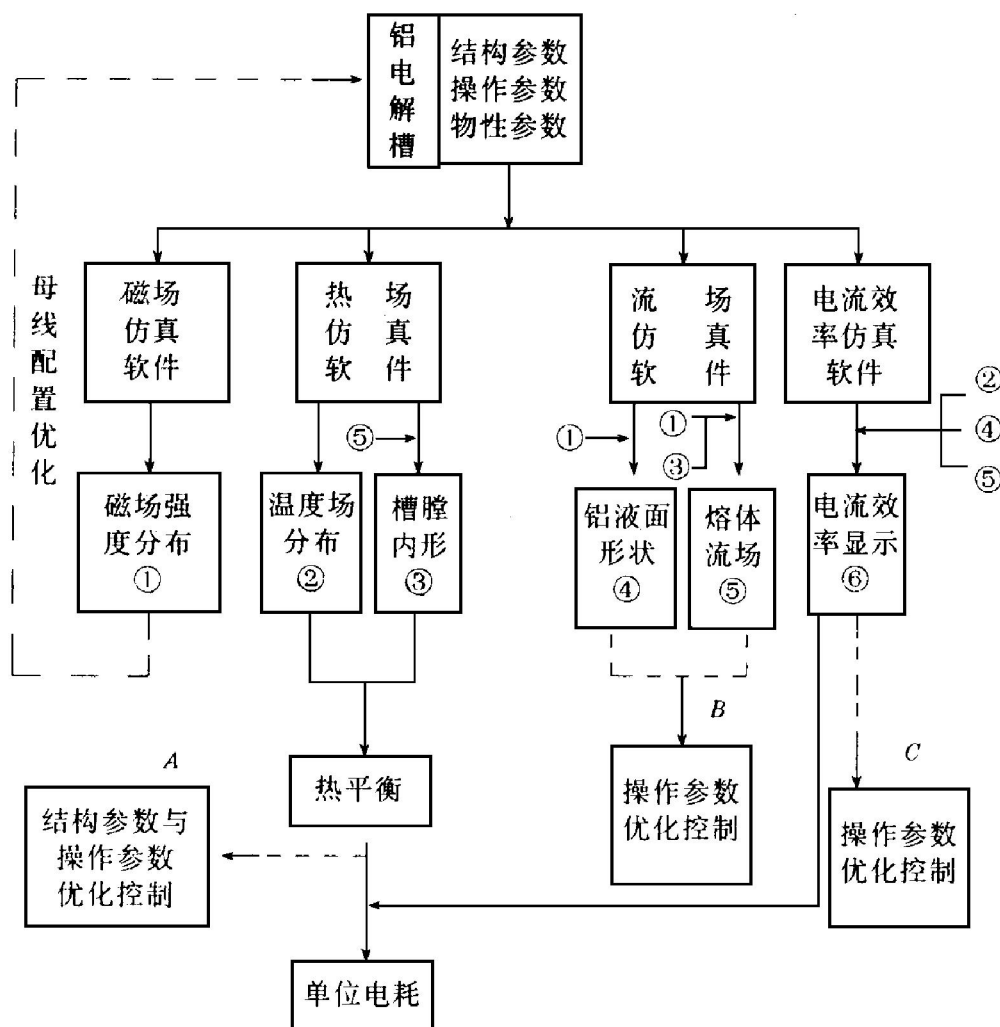
- (1) 电磁场、热场、槽膛内形、流场、铝液面形状及电流效率的预报;
- (2) 优化母线配置设计;

- (3) 优化槽内衬结构设计;
- (4) 提供槽况诊断与过程监控信息;
- (5) 为电解槽操作优化控制提供决策支持。

某铝厂应用此软件，改进了母线配置与槽内衬结构，使 160 kA 预焙槽的电流效率提高了 3%~4%，吨铝电耗降低 400~500 kWh，效益十分明显。

3.2 镍熔炼电炉模糊仿真与模糊优化决策支持系统

镍熔炼矿热电炉的原料与产出物料种类多，成分复杂、不稳定，检测结果滞后。对此类对象的数学模拟宜采用模糊分析法，即从现场积累的大量生产数据中，通过逐步回归分析与模糊聚类处理(模糊化)，优选出技术经济效益最佳的操作数据，再利用条件语句建立一系列模糊决策规则与优化配料、优化操作模型。



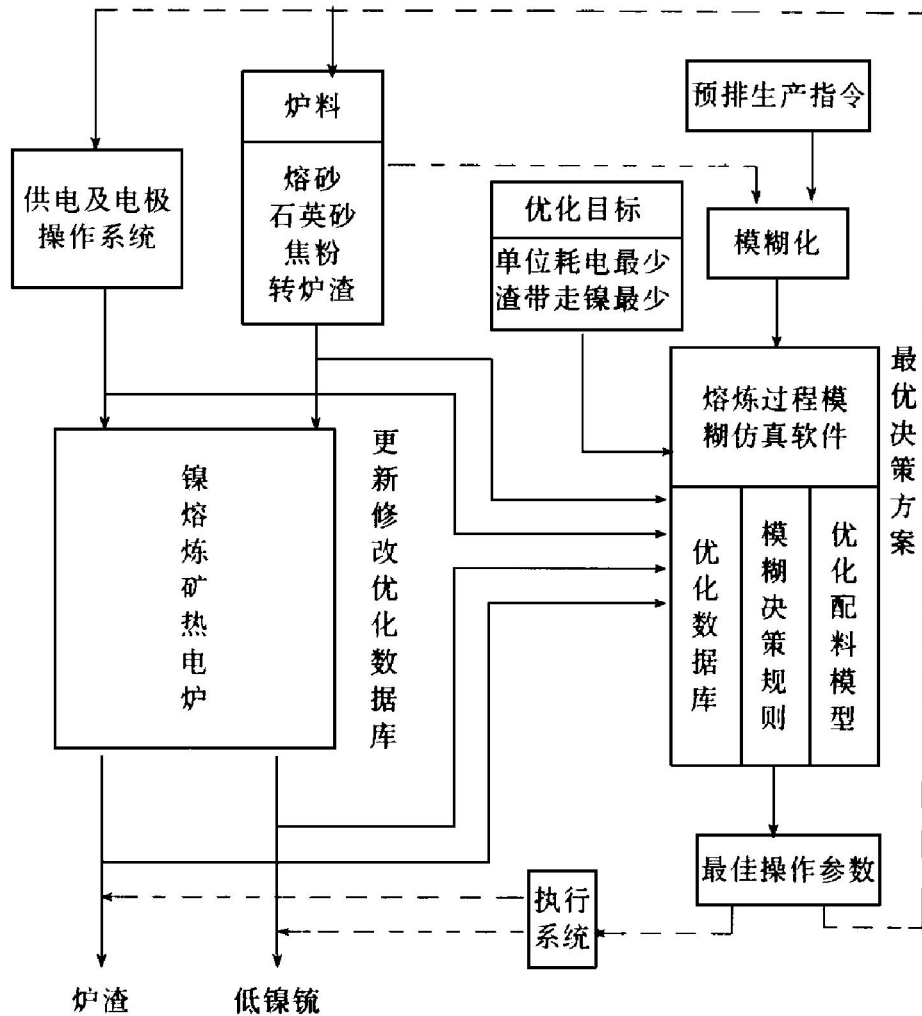


图3 镍熔炼电炉离线式模糊仿真与模糊优化决策系统

——→程序调用; - - -> 离线调用

6 周子民等. 中南矿冶学院学报, 1991, 22(1): 46- 53.

7 Zhou J M *et al.* Industrielle Elektrowarme, 1990, 48(4): 210- 215.

8 彭小奇等. 中国有色金属学报, 1994, 4(1): 96- 100.

9 彭小奇等. 控制理论与应用, 1994, 11(5): 582- 587.

10 梅 焱. 有色冶金炉. 北京: 冶金工业出版社, 1994.

11 Crowe E R *et al.* Chemical Engineering Progress, 1995, 91 (1): 22- 31.

SIMULATION AND OPTIMIZATION OF NONFERROUS-METALLURGICAL FURNACES

Mei Chi, Wang Qianpu, Peng Xiaoqi, Zhou Jiemin

Department of Applied Physics and Heat Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT The characteristics of nonferrous-metallurgical furnaces(NMFs) have been discussed. As research subjects, NMFs can be regarded as high-temperature reactors, and all main studies for which can be generalized into “three T’s and two R’s”, namely, momentum transfer, heat transfer, mass transfer, kinetics of chemical reaction and design and structure principle of furnace reactors. An effective approach of furnace research was presented, that is, “mathematical modelling—computer simulation in hologram—comprehensive optimization”, and some successful applications of which were cited.

Key words nonferrous-metallurgical furnaces simulation optimization research method

(编辑 李 军)